

複数回焼きならし処理 2. 25Cr-1Mo 鋼の 溶接熱影響部細粒域クリープ損傷挙動

○手塚 英志 (東京電力)

Creep damages of fine grained heat affected zone of welded 2.25%Cr-1%Mo steel with plural times of normalizing before welding.

by

○Hideshi Tezuka Materials Engineering Group, R&D Center, The Tokyo Electric Power Company Inc.

1 緒言

火力発電所の主蒸気管、高温再熱蒸気管などの大径管には、2.25Cr-1Mo 鋼が広く用いられている。これらの配管は、素材として厚肉鋼板を用い、曲げ加工して長手シーム溶接を施すことにより製造されたものがあり、当該溶接部でのクリープ損傷が主な寿命支配因子となっている。

溶接部のクリープ損傷は、その発生位置により4種に分類される¹⁾が、この内、溶接熱影響部 (HAZ) 細粒域のタイプIV損傷について、著者らは、実機廃却部材に認められたタイプIV損傷域の詳細な観察により、下記の点を明らかにしてきた。

- ① 粒界および粒内に炭化物が極端に凝集した結晶粒が、タイプIV損傷域にのみ存在する
- ② 同結晶粒では、粒界でのボイド発生が著しく、粒内のマトリックスが粒界から剥離している (試料調整の際に、脱粒して「細孔」として現れる)
- ③ 上述の損傷粒界は、旧オーステナイト粒界上に分布していると考えられる

溶接前の旧オーステナイト粒界上に、炭素の偏り (例えば粗大炭化物など) が点在しており、溶接熱影響の際に、その部分で炭素濃度の高い結晶粒ができることが原因であると考えている^{2,3)}。

さらに、実機廃却部材から試験片を採取してクリープき裂進展試験を実施し、破面観察によりき裂進展経路を確認して旧オーステナイト粒界との関連などを調べたところ、き裂が旧オーステナイト粒界を進展したことを強く示唆する破面が認められた。また、実機使用中の損傷が著しかった部位では細粒の粒界を被ってネットワーク状に成長した炭化物が認められ、旧オーステナイト粒界に位置する細粒で、粒界炭化物の凝集粗大化が著しいことが確認された⁴⁾。

これらのことから、溶接前の素材について焼きならし処理を十分に行うことにより、旧オーステナイト粒界上に分布すると考えられる炭素の偏りを解消すれば、タイプIV損傷の発生を遅らせることができると考えた。ただし、焼きならし処理時間を延長すると母材の強度特性に

影響があることが懸念されたので、現在採用されている時間の焼きならし処理を複数回行う「複数回焼きならし処理」を試みることにした。

2 実験方法

2.1 供試材

供試材は、長時間運用されタイプIV損傷が発生した廃却 2.25Cr-1Mo 鋼製弁体この母材部に対して、鍛造・熱処理を施して素材 (従来プロセス/高不純物材) とした。製作条件を Table 1 に、化学成分を Table 2 に示す。また、不純物レベルの違いの影響を確認するため、市販の 2.25Cr-1Mo 鍛鋼も供試材として用いた。鍛造後の熱処理・板厚は高不純物材と同じで、化学成分は Table 2 に示すとおりである (従来プロセス/低不純物材)。前者のクリープ脆化係数 (CEF: Creep Embrittlement factor) は 0.227、後者は 0.053 である。

従来プロセス材について、U 開先を加工し、実機に用いられているのと同じサブマージドアーク溶接法 (SAW) にて大型継ぎ手材を製作した。なお、初層近傍は被覆アーク溶接法 (SMAW) により接合した。予熱温度は 473K 以上とし、SAW の積層数は 9 層とした。溶接後には、988K×4Hr. の後熱処理を施した。

従来プロセス材に対し、さらに Table 3 に示す熱処理を施して複数回焼きならし処理材を製作した。同材および従来プロセス材から、 $\phi 16 \times L150\text{mm}$ の試験片を製作し、高周波加熱コイルで 1,173~1,223K にて繰り返し加熱することにより、HAZ 細粒再現材を製作した。また、その後、988K×4Hr. の後熱処理を施した。

Table 1 Forging ratio and heat treatment of the material.

Material	2.25Cr-1Mo Cast Steel
Forging Ratio	$\geq 4S$
Normalizing	1,213K×3Hr. A.C.
Tempering	1,013K×4.3Hr.
Thickness	50mm

Table 2 Chemical composition of the base metal (wt%)

Impurity content	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	V	Sol. Al	Sn	As	Pb	Sb
High	0.13	0.47	0.52	0.022	0.019	2.56	0.95	0.22	0.16	0.009	0.034	0.026	0.026	0.0001	0.0060
Low	0.12	0.28	0.54	0.010	0.014	2.24	0.95	0.08	0.13	0.018	0.020	0.006	0.006	0.0001	0.0008

$$CEF=P+2.4As+3.6Sn+8.2Sb$$

Table 3 Heat treatment of the 'Plural Times Normalizing' material.

Normalizing	1,213K×3Hr. A.C. + 1,213K×3Hr. A.C.
Tempering	1,013K×4.3Hr.

2.2 試験方法

従来プロセス材（大型継ぎ手材、HAZ 細粒再現材）および複数回焼きならし処理材（HAZ 細粒再現材）から、Fig.1 に示すラウンドノッチ（一部ダブルラウンドノッチ）付きクリープ破断試験片を採取した。なお、大型継ぎ手材では、HAZ 細粒域がノッチ底に位置するように、マクロエッチにより金属組織を確認しながら試験片採取を行った。クリープ破断試験の条件を Table 4 に示す。

試験片が破断した後、ノッチ部について樹脂埋め込み、研磨の後、2%ナイトール液でエッチングの後、マクロ組織観察および光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡（SEM）観察を行った。また、873K×54MPa の条件については、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて抽出レプリカによる析出物観察も実施した。

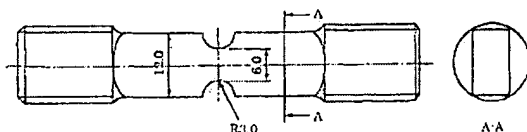


Fig.1 Round-notched plate specimen for creep rupture tests

Table 4 Conditions of creep rupture tests

Temperature (K)	Stress (MPa)
873	54
898	32
923	45

3 実験結果

3.1 供試材の組織

Fig.2 に従来プロセス／高不純物材の大型継ぎ手材の断面マクロ組織を示す。また、Fig.3 に各部位の光学顕微鏡観察結果を示す。溶接部に欠陥等は認められず、また母材は実機材相当のフェライトーベイナイト組織を呈していた。従来プロセス／低不純物材についても観察を行

ったが、差異は認められなかった。

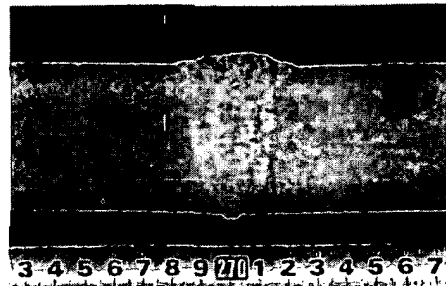


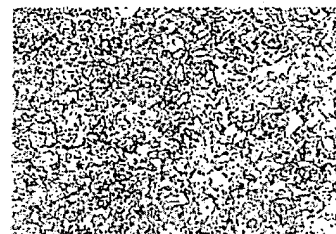
Fig.2 Cross section of the welded joint



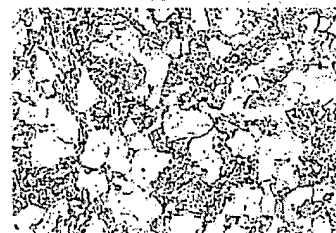
(a) Weld



(b) Coarse-grained HAZ



(c) Fine-grained HAZ



(d) Base metal

Fig.3 Optical micrographs of the welded joint

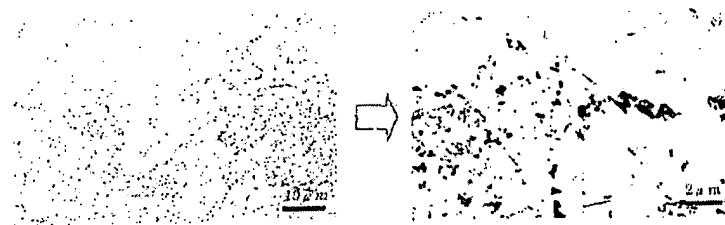
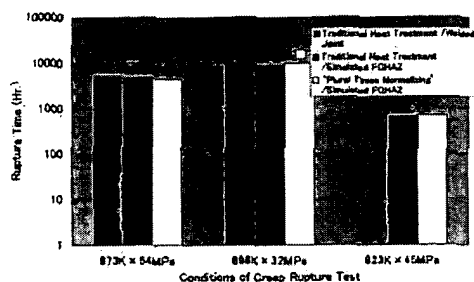


Fig.4 TEM micrographs of precipitates extracted from FGHAZ of the welded joint

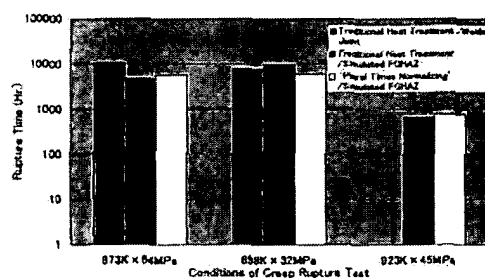
3.2 クリープ破断試験

Fig.5 にクリープ破断試験結果を示す。複数回焼きならし／高不純物材の 898K×32MPa の試験は、10,000 時間以上継続しても破断せず、試験を中止した。高不純物材、

低不純物材ともに、クリープ破断時間に大きな違いは認められず、製作プロセスの違いによる影響は明確ではなかった。



(a) Impurity level: High



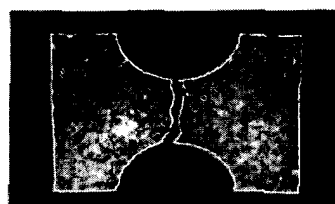
(b) Impurity level: Low

Fig.5 Results of creep rupture tests

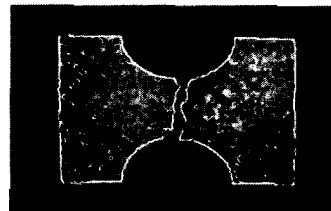
3.3 クリープ破断試験後組織観察

Fig.6 に 873K×54MPa の条件で実施したクリープ破断後試験片のマクロ組織観察結果を、Fig.7 にミクロ組織観察結果を示す。複数回焼きならし処理／低不純物材において、顕著な破断伸びが認められる。同試料では、Fig.7(d)に示すように、結晶粒が大きく変形してから破断しており、タイプIV損傷の発生は認められない。一方、従来プロセスでは、不純物レベルにかかわらずタイプIV損傷の発生が認められた。また、従来プロセスで製作した大型継ぎ手材は、全て HAZ 細粒域においてタイプIV損傷が発生して破断しており、破断伸びも小さかった。なお、これらの特徴は、他の条件で実施したクリープ破断試験片でも同様に認められた。

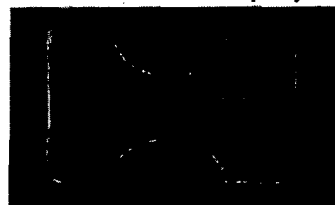
Fig.8 に、873K×54MPa の条件で実施したクリープ破断後試験片の、破断位置近傍から採取した抽出レプリカによる析出物 TEM 観察結果を示す。顕著な差異は認められないが、従来プロセス／高不純物材では、実機の損傷部で認められたものと同様な炭化物の顕著な凝集域²⁻⁴⁾が認められる。一方、複数回焼きならし処理材では、顕著な凝集域は認められない。



(a) Traditional heat treatment / Impurity level: high



(b) Traditional heat treatment / Impurity level: low

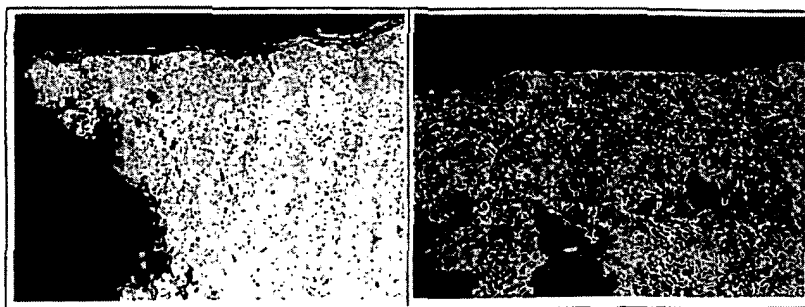


(c) 'Plural times normalizing' / Impurity level: high



(d) 'Plural times normalizing' / Impurity level: low

Fig.6 Apparatus of ruptured specimens



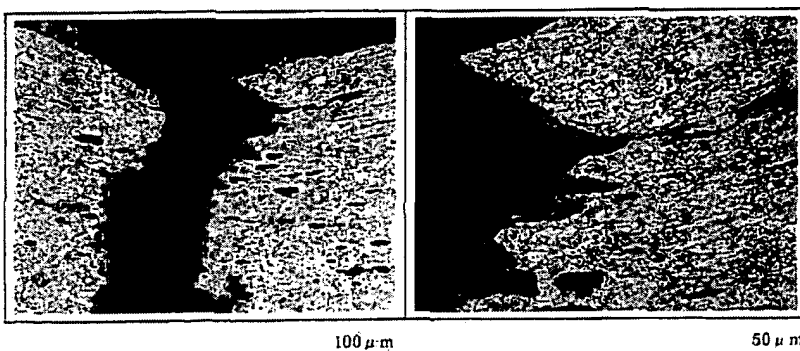
(a) Traditional heat treatment / Impurity level: high



(b) Traditional heat treatment / Impurity level: low



(c) 'Plural times normalizing' / Impurity level: high



100 μ m

50 μ m

(d) 'Plural times normalizing' / Impurity level: low

Fig.7 Optical micrographs of fractured specimens

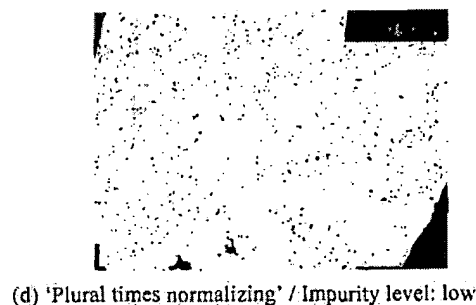
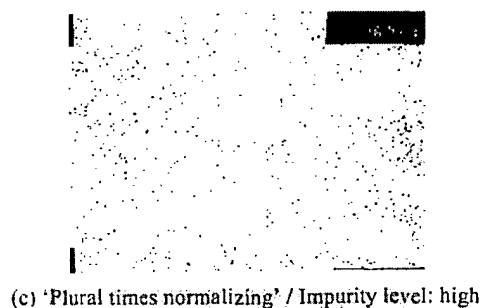
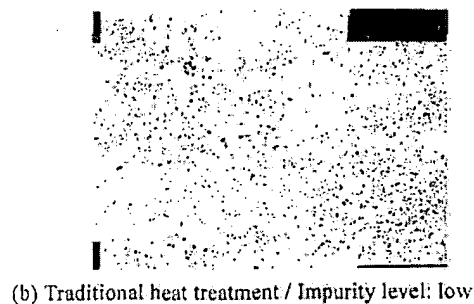
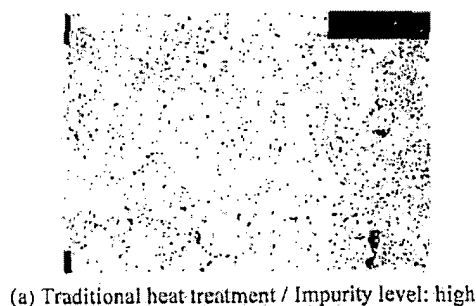


Fig.8 TEM micrographs of precipitates extracted from ruptured specimens

4 考察

タイプIV損傷の発生を遅らせることを目標に、「複数回焼きならし処理」を試みた結果、低不純物材においてタイプIV損傷が発生せず、クリーブ破断伸びが顕著に増加した。また、実機の損傷部で認められた炭化物凝集域は認められなかった。このことから、「複数回焼きならし処理」は、タイプIV損傷の発生を抑制する方法として有効であることが示された。

一方、高不純物材においては、複数回焼きならし処理材でもタイプIV損傷が発生し、クリーブ破断伸びも、従来プロセス材と大差なかった。この原因については、解析が未了だが、不純物レベルの違いによるものであると考えられる。このことは、タイプIV損傷の発生が不純物元素の粒界への偏析と、炭化物凝集域の発生の双方に支配されており、その抑制のためには双方ともに改善することが必要であることを示している。

現今の材料は不純物レベルが低いことから、タイプIV損傷は発生しにくいと考えられてきたが、「複数回焼きならし処理」のように、素材の均質化を進め、炭化物凝集域の発生を防止する手法を併用すれば、タイプIV損傷をより有効に抑制することができると考えられる。

5 結論

- (1) 複数回焼きならし処理／低不純物材において、タイプIV損傷が発生せず、クリーブ破断伸びが顕著に増加した。
- (2) 複数回焼きならし処理材においては、炭化物の凝集域は認められなかった。
- (3) 複数回焼きならし処理／高不純物材においては、タ

イプIV損傷が発生し、クリーブ破断伸びは従来プロセス材と大差なかった。

- (4) 不純物レベルが低い材料に対し、複数回焼きならし処理を施すことで、タイプIV損傷を効果的に抑制できる可能性が示された。

参考文献

- 1) F. V. Ellis, R. Viswanathan, Fitness-for-Service Evaluations in Petroleum and Fossil Power Plants, ASME PVP 380, 59, (1998).
- 2) 手塚 英志、鉄と鋼、89, 1248, (2003)
- 3) 手塚 英志、第41回高温強度シンポジウム前刷集、94, (2003)
- 4) H. Tezuka, T. Sakurai, Intl. J. Pressure Vessels & Pipings, 82, 165, (2005).
- 5) 手塚 英志、第42回高温強度シンポジウム前刷集、16, (2004).